WIRBELSTROM-DREHMOMENTMESSER FÜR KLEINE DREHMOMENTE

VON DIPL.-ING. ANTON M. SPRINGER

SONDERDRUCK AUS
ARCHIV FÜR TECHNISCHES MESSEN
LIEFERUNG 208/1953. SEITEN 103/104

VERLAG R. OLDENBOURG, MÜNCHEN

Eltro

GESELLSCHAFT FÜR STRAHLUNGSTECHNIK

Wirbelstrom-Drehmomentmesser für kleine Drehmomente

V 136—4

Mai 1953

Verfasser: Dipl.-Ing. Anton M. Springer

DK 621.317.78

Zweck der Meßvorrichtung

Zur Messung kleiner Drehmomente eignen sich nur Meßvorrichtungen, die selbst keine zu großen Reibungsverluste aufweisen. Die bekannten mechanischen Bremsvorrichtungen zum Messen des Drehmomentes einer Arbeitsmaschine, etwa der Pronysche Zaun, lassen zwar ein kontinuierliches Ansteigen der Last zu, jedoch nur bedingt ein gleichmäßiges Abnehmen der Belastung. Es ist weiter ein Nachteil, daß durch solche mechanische Bremsvorrichtungen eine zusätzliche Radiallast auf die Achse des zu prüfenden Gerätes ausgeübt wird.

Demgegenüber ist die Wirbelstrombremse z. B. als Scheibenbremse nach Bild 1 bzw. 4 bei kontinuierlicher Lastzunahme und -abnahme brauchbar. Jedoch eignet sie sich nicht zum Messen des Anlaufmomentes einer Arbeitsmaschine, da ja nur während der Bewegung der Bremsscheibe Wirbelströme auftreten und erst dadurch eine Bremswirkung entsteht. Für sehr kleine Motore ist außerdem die durch die Meßvorrichtung auftretende Radialkraft (zusätzlicher Lagerdruck) nicht zu vernachlässigen; diese Radialkraft vergrößert sich noch mit der Belastung der Maschine. Durch eine besondere Anordnung zur Messung der Umfangskraft bei der unten beschriebenen Wirbelstrombremse kann diese Radialkraft aufgehoben werden.

1. Bremsleistung und Bremskraft

Die mit der Geschwindigkeit v bewegte Scheibe wird nach Bild 1 von dem Magnetfeld eines Polpaares durchsetzt. Um einfache und hinreichend brauchbare Gleichungen für Bremsleistung und Bremskraft eines Polpaares zu erhalten, macht man nach Rüdenberg[1] folgende Annahmen.

Es ist eine wechselnde Folge von Polpaaren vorhanden und die magnetische Induktion verläuft in Bewegungsrichtung nach einer Sinusfunktion mit der Polteilung τ; die Werte für ein Polpaar entsprechen dann denen einer Sinus-Halbwelle des Feldverlaufs. Weiter wird statt der sich drehenden runden Scheibe ein mit v geradlinig bewegter Streifen von der Breite b angenommen, die der Wirkungsbreite der Wirbelströmung entspricht; auch in der Richtung von b sei der Feldverlauf sinusförmig.

Betrachtet man dann die in der Scheibe bzw. dem Streifen entstehende Wirbelströmung, so ergibt sich für die Polteilung eine in Wärme umgesetzte Leistung

$$N = \frac{1}{4} \cdot \frac{\delta_1}{\varrho} \cdot v^2 \cdot B^2 \cdot b^2 \cdot \frac{w}{\left(\frac{v}{\varrho} l\right)^2 + w^2} \cdot 10^{-7} \qquad (1)$$

in W, wo noch bedeuten: ϱ den spezifischen Widerstand der Bremsscheibe in Ω/cm, v die Geschwindigkeit in cm/s, B die magnetische Induktion der Bremsmagnete in Polmitte in Gauß, b die Bremsscheibenbreite und τ die Polteilung in cm, schließlich

$$w = \left(\frac{\tau}{b} + \frac{b}{\tau}\right) \text{ und } l = 4\frac{\delta_1}{\delta} b \qquad (2)$$

(δ und δ_1 nach Bild 1 in cm). Bei kleinen Geschwindigkeiten v wächst N zunächst mit deren Quadrat, dann aber wegen der steigenden Rückwirkung der Wirbelströme nach Bild 2 nur weniger bis zu seinem Grenzwert bei $v = \infty$:

$$N_\infty = \frac{1}{64} \cdot \frac{\delta^2}{\delta_1} \cdot \varrho \cdot B^2 \cdot w. \qquad (3)$$

Diese Grenzbremsleistung ist also um so größer, je dünner die Scheibe und je höher der spezifische Widerstand der Scheibe ist. Die Bremskraft P erhält man als Quotient der Bremsleistung N durch die Geschwindigkeit v. Sie beträgt

$$P = \frac{1}{4} \frac{\delta_1}{\varrho} \cdot v \cdot B^2 \cdot b^2 \cdot \frac{w}{\left(\frac{v}{\varrho} l\right)^2 + w^2}, \qquad (4)$$

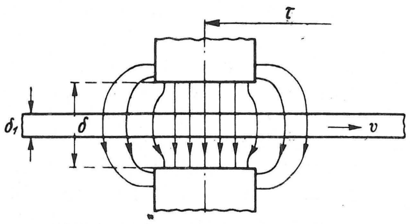

Bild 1. Schema der Anordnung.

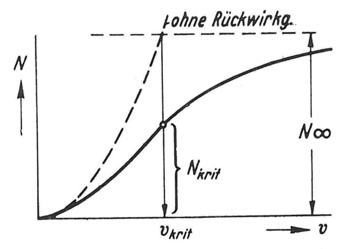

Bild 2. Bremsleistung N in Abhängigkeit von der Bremsscheibengeschwindigkeit.

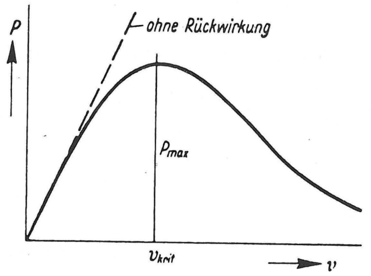

Bild 3. Bremskraft P in Abhängigkeit von der Bremsscheibengeschwindigkeit.

nimmt also zunächst linear mit v zu und dann nach Bild 3 langsamer. Maximum der Bremskraft und Wendepunkt der Leistungskurve liegen bei derselben Geschwindigkeit $v_{\text{krit}} = \varrho w / l$. Man erhält für die kritische Bremskraft

$$P_{\text{krit}} = \frac{1}{32} \cdot b \cdot \delta \cdot B^2. \qquad (5)$$

Die Größe der kritischen Bremsleistung beträgt

$$N_{\text{krit}} = \frac{1}{128} \cdot \frac{\delta^2}{\delta_1} \cdot \varrho \cdot w \cdot B^2. \qquad (6)$$

Dieser Ausdruck läßt erkennen, daß die kritische Bremsleistung genau die Hälfte der überhaupt möglichen Leistungsumsetzung ist (vgl. Bild 2).

Die Abnahme der Bremskraft oberhalb der kritischen Geschwindigkeit ergibt sich auch aus der Verschiebung der unterhalb der Pole liegenden Wirbelströmung, um einen Winkel ψ, für den $\operatorname{tg} \psi = v/v_{\mathrm{krit}}$ ist. Durch die Rückwirkung der Wirbelströme verschieben sich die Wirbelfelder in der Bewegungsrichtung der Bremsscheibe. Im kritischen Zustand erreicht der Verschiebungswinkel einen Wert von 45°. Bei weiterer Erhöhung der Geschwindigkeit verschiebt sich die Wirbelströmung ebenfalls weiter und kommt schließlich unter den Einfluß des nächsten, entgegengesetzten Polpaares.

Durch die Form der Bremsmagnetpole enthält das magnetische Feld auch Oberwellen. Rechnet man den Einfluß der Oberwellenströme nach, so zeigt sich, daß auch für diese die Bremskraft ein Maximum erreicht. Dieses liegt jedoch bei größeren Geschwindigkeiten höher als das Maximum der Grundwelle. Die Bremsleistung strebt ebenfalls bei sehr hohen Geschwindigkeiten einem Grenzwert zu, welcher größer ist als beim Grundfeld allein.

Betrachtet man die kritische Geschwindigkeit für die Oberwellen, so ersieht man daraus, daß es leicht vorkommen kann, daß bei stark ausgeprägten Oberwellenfeldern die wahre kritische Geschwindigkeit der Bremse weit über der des Grundfeldes liegt $\left(v_{\mathrm{krit}\,0} = \varrho \frac{w_0}{l_0}\right)$; sie wächst mit der Ordnungszahl der Oberwellen.

2. Bemessung der Bremse

Eine Bremse ist am wirtschaftlichsten, wenn bei kleinstem Materialaufwand der Scheibe eine möglichst große Leistung abgebremst werden kann. Das Produkt aus der wirksamen Breite b des Bremsstreifens und seiner im magnetischen Feld liegenden Länge L muß also ein Minimum sein. Mit Gl. (1) als Bremsleistung je Polteilung τ ist die gesamte Bremsleistung einer Bremse also $\frac{L}{\tau} \cdot N$. Die Bremse fällt mithin bei verlangter Bremsleistung klein aus, wenn Lb klein wird, bzw. wenn

$$\frac{b}{\tau} \frac{w^2}{\left(\frac{v}{\varrho} l\right)^2 + w^2} = \frac{1 + (b/\tau)^2}{\left(\frac{4 v \delta_1 b}{\varrho \delta}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{b} + \frac{b}{\tau}\right)^2}$$

groß wird. Der Ausdruck $\frac{v}{\varrho} \cdot l$ ist um so größer, je größer die Rückwirkung der Ströme ist; für $v\delta_1/\varrho$ gibt es einen günstigsten Wert, bei dem die Bremse im kritischen Zustand arbeitet. Es deckt sich also günstige Dimensionierung mit der Forderung nach geringer Rückwirkung.

3. Ausgeführte Bremse

Im wesentlichen besteht die Wirbelstrombremse nach Bild 4 aus einer mit der Antriebswelle der zu prüfenden Maschine verbundenen Kupfer- oder Aluminiumscheibe *Bs*, die sich zwischen Elektromagneten *Bm* mit veränderlichem Feld dreht. Am Umfang der die Elektromagnete tragenden Scheibe *Al* werden die Kräfte gemessen, mit denen die Bremsscheibe die Elektromagnete mitzunehmen versucht. Die Kräfte der Wirbelströme können mit Hilfe einer Waage *F* gemessen werden. Das Drehmoment ergibt sich dann aus dem Produkt der Umfangskraft mal Radius der Schnurumschlingung (bei der in Bild 4 dargestellten Bremse 5 cm).

Die an sich erwünschte Forderung, daß die Umfangskraft und das Drehmoment von Drehzahl und Geschwindigkeit linear abhängt, ist nach Gl. (4) nur für kleine v erfüllt. Nach Überschreiten der kritischen Geschwindigkeit (dem Maximum der Bremskraft) würde die Bremse wegen der Rückwirkung nicht mehr stabil arbeiten. Bei kleinen Wirbelstrombremsen liegt die kritische Geschwindigkeit bzw. Drehzahl aber fast immer hinreichend hoch. Sie betrug bei der in Bild 4 dargestellten Bremse 2750 U/min.

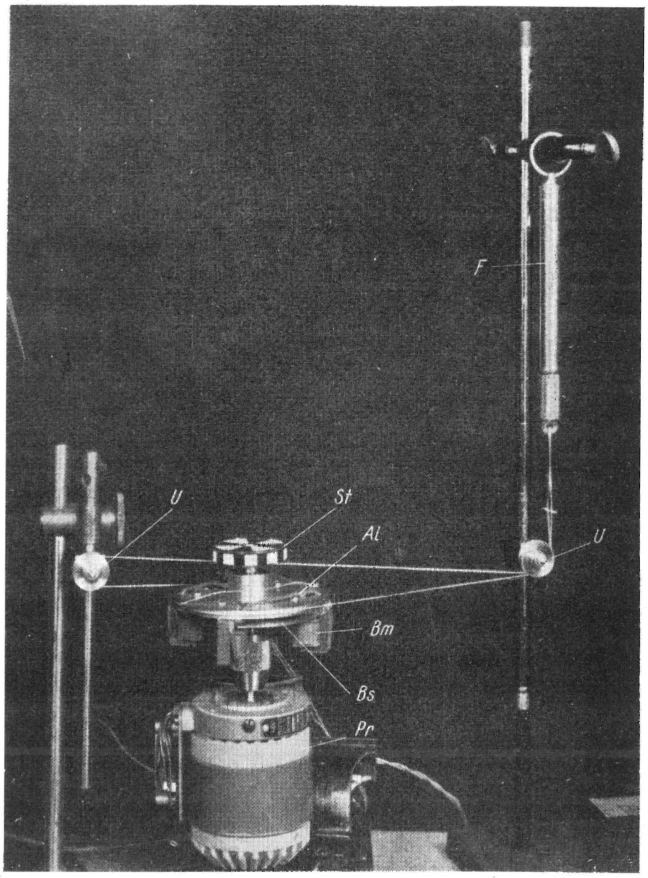

Bild 4. Meßaufbau zur Drehmomentmessung für 3000 gcm bei 1500 U/min, entsprechend etwa 40 W.
F Federwaage — *Bm* Bremsmagnete
U Umlenkrollen — *Bs* Bremsscheibe (Cu)
St stroboskopische Scheibe — *Pr* Prüfling, Meßobjekt
Al Al-Scheibe

Die Reibungsfehler der Waage sind wegen der von der Rotation bedingten Erschütterungen nur gering. Der Einfluß der Temperatur kann durch verschiedene Maßnahmen kompensiert werden[2, 3].

Bild 5 zeigt die Drehmomentkurve eines selbst anlaufenden Synchronmotors in Abhängigkeit von der aufgenommenen Leistung. Bei dieser Messung ist die Belastung allmählich gesteigert und anschließend verkleinert worden.

Die beiden Stufen in der Kurve lassen deutlich erkennen, bei welchem Drehmoment der Motor in Tritt und außer Tritt fällt. Für die kritische Drehzahl ergab sich eine Abweichung von nur 5% vom berechneten Wert.

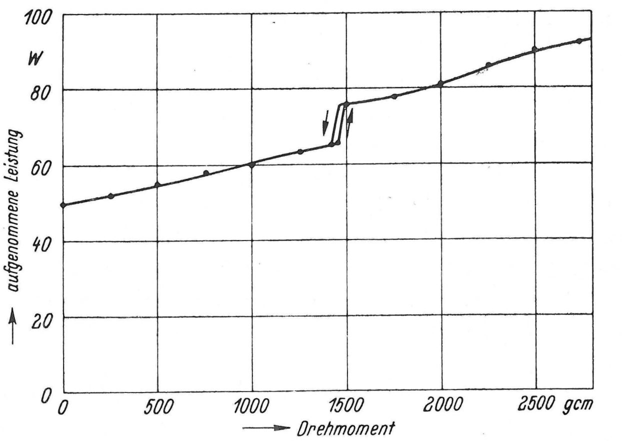

Bild 5. Drehmomentkurve eines selbst-anlaufenden Synchronmotors Papst-St. Georgen, Type S 6 E/220, Nr. 8067, für 225 V mit 5 μF in der Hilfsphase.

Schrifttum

1. R. Rüdenberg, Energie der Wirbelströme, Sonderausgabe, Stuttgart, Ferd. Enke, Stuttgart 1906. — 2. B. Richter, ATM-Blatt J 162—7 (Juli 1951). — 3. G. Keinath, ATM-Blatt J 162—1 (März 1935).